

De natuurlijke rij van de tonen

Hoe de natuurlijke rij de toon kleurt, de harmonie bepaalt en de melodie mogelijk maakt



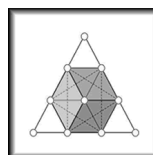
Jeroen Vanesser

lector **muziek**, KHLim dep. Lerarenopleiding, auteur methode Cadans

Renaat Frans

lector **fysica**, KHLim dep. Lerarenopleiding en Universiteit Antwerpen dep. Natuurkunde

De natuurlijke rij van de tonen



Oude band/nieuwe band (her)ontdekken

Rond 3 muzikale componenten:

- Toon
- Harmonie en Melodie
- Vorm

De natuurlijke rij van de tonen

Een oude band herontdekken



Pythagoreïsche (natuur)filosofie (vanaf 6de eeuw v. C.)

- Geloof in **esthetica** en mathematische orde
- Muziek en wiskunde: de essentiële constituenten van de wereld
(cfr. Plato's 'Timaeus': Uit getalsverhoudingen (**kwinten**, kwarten en octaven), wordt het zijnde en het wordende opgebouwd)

Middeleeuwse vorming

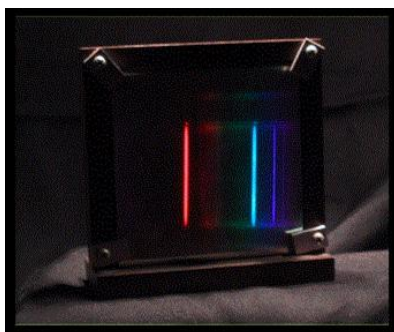
- Trivium (Grammatica, Retorica, Dialektiek)
- **Quadrivium** (Aritmetica, Geometria, Astronomia en **Musica**)

De natuurlijke rij van de tonen

Een nieuwe band ontdekken?

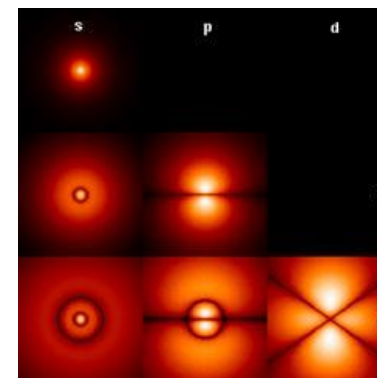
De rol van muziek in de theoretische natuurkunde: kwantumfysica

- Niet alleen licht maar ook materie (protonen, neutronen, elektronen) kunnen maar begrepen worden als golf.
- Golffuncties zijn als **muzikale trillingen**:
slechts een natuurlijke rij kan bestaan -> kwantumkarakter van materie en energie



Discreet kleurenspectrum van waterstof

$$\text{energy} = h \times \text{frequency}$$



Discrete golffuncties van het elektron in het waterstofatoom

rond **Toon**

Wat is geluid?

- Verstoring (verdichtingen en verdunning) in een elastisch medium (bv. lucht) die zich voortplant
Vliegtuiglawaai, trillende aarde bij het voorbijrijden van vrachtwagen,...

Is er transport van materie?

- Nee, wel van energie

Hoe verander je het volume?

- Door de amplitude (maximale uitwijking) van de trilling te wijzigen

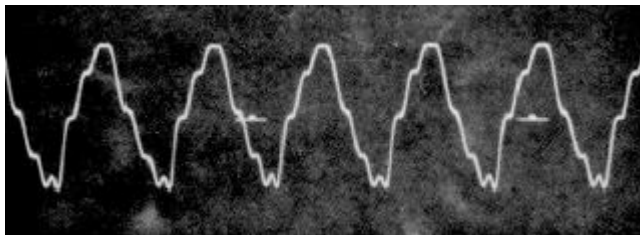
rond **Toon**

Wat onderscheidt toon van geluid?

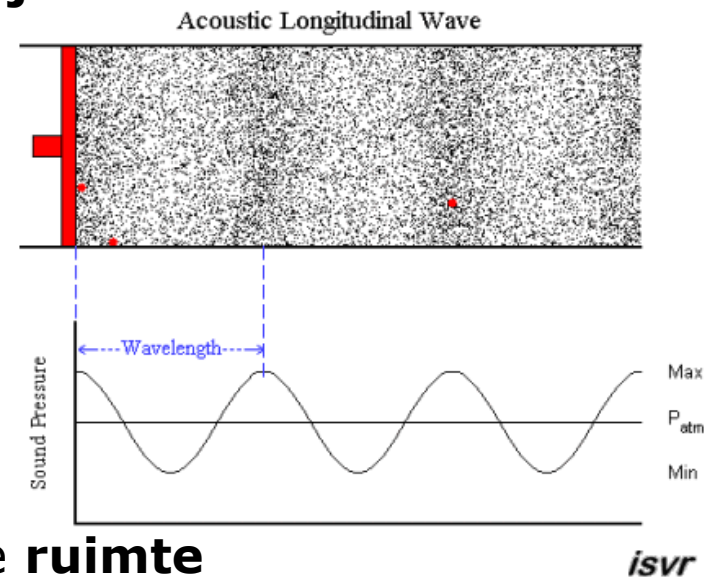
vaste frequentie, vaste vorm, vaste amplitude

Periode: oscillatie-afdruk in de **tijd**

Een *harmonische* trilling
herhaalt zich na een periode T



Klarinettoon van C 258 Hz
(Bron: James Jeans)



Golflengte λ : oscillatie-afdruk in de **ruimte**

Trilling spreidt zich uit in de ruimte met een vaste lengte, waarna het patroon zich herhaalt.

Een trilling zonder vaste frequentie en vorm is ruis.

Muziek is een kunst in ruimte én tijd.

rond Toon

Hoe verander je de toonhoogte?

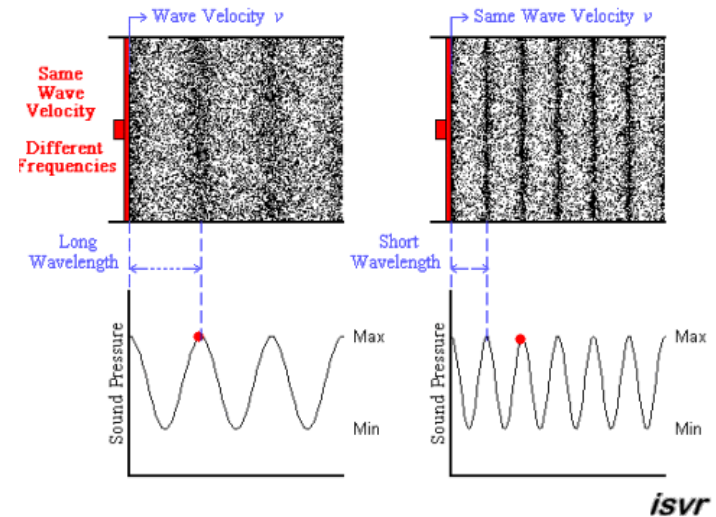
- Door de frequentie van de trilling te wijzigen

Mathematisch verband tussen frequentie en periode?

- Frequentie en periode zijn elkaars omgekeerde

Bv. Als $f=100$ Hz,
dan is $T= 1/100$ s

$$f = \frac{1}{T}$$



Verband tussen frequentie en golflengte?

- Golflengte is omgekeerd evenredig met de frequentie

Evenredigheidsconstante is de voortplantingssnelheid van de golf in het medium

$$\lambda = v \cdot \frac{1}{f}$$

rond **Toon**

Hoe wordt een toon opgewekt?

- Door een trillend systeem
 - Trillende snaar (chordofonen)
 - Trillende lucht in een buis (aerofonen)
 - Trillend vel (membranofonen)
 - Trillend lichaam (idiofonen)
 - Stem is combinatie van de voorgaande
 - Elektrofonen?

Hoe verander je de grondtoon van je toonverwekker?

- Door de randvoorwaarden L , F en m te wijzigen
(onderzocht door Vincenzo Galileï, 16^{de} eeuw)

$$f = \frac{\pi}{2L} \sqrt{\frac{F}{m}}$$
 Lengte L , spankracht F (of druk bij aerofoon),
massa per lengte-eenheid m (bij membrano-, chordo- en aerofonen)

Laat L , F en m onveranderd:

Welke tonen kan je aanslaan?

Op een aerofoon (trillende lucht) ?

Op een membranofon (trillend vel) ?

Op een chordofoon (trillende snaar) ?

Slechts een discrete rij van tonen kan bestaan!

$$f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 \dots$$

Er kunnen geen tonen
met willekeurige frequenties aangeslagen worden.

Alleen tonen met frequenties die in de rij passen,
kunnen bestaan op een toonverwekker
met gegeven randvoorwaarden van L , F en m

Analogie rij discrete golffuncties van gebonden elektronen, protonen,...

Laat L , F en m onveranderd:

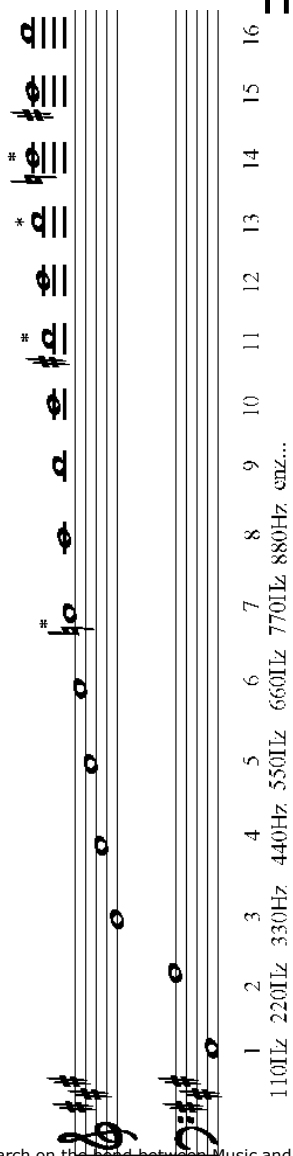
Welke tonen kan je aanslaan op aerofonen en chordofonen?

Alleen tonen
waarvan elke volgende frequentie
een geheel veelvoud is van de vorige
kan je aanslaan!

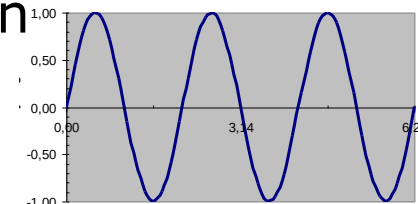
$$f_1, 2f_1, 3f_1, 4f_1, 5f_1 \dots$$



De natuurlijke rij van de tonen: mogelijke frequenties van de golven

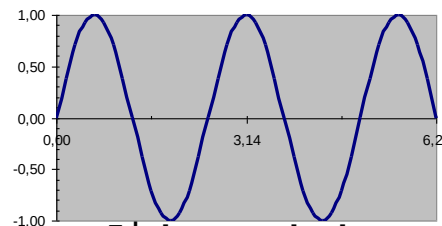


$$f_6 = 6 f_1$$



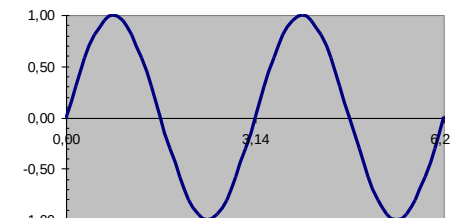
6^{de} harmonische

$$f_5 = 5 f_1$$



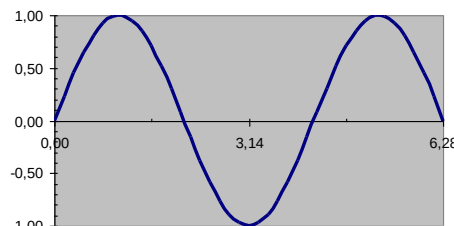
5^{de} harmonische

$$f_4 = 4 f_1$$



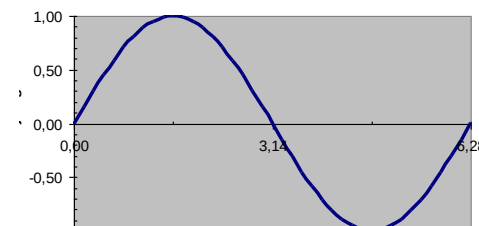
4^{de} harmonische

$$f_3 = 3 f_1$$



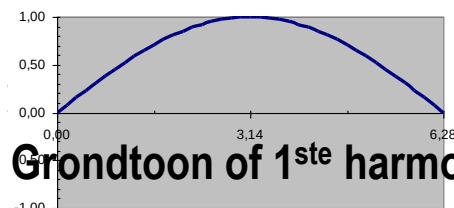
3^{de} harmonische

$$f_2 = 2 f_1$$



2^{de} harmonische

$$f_1$$

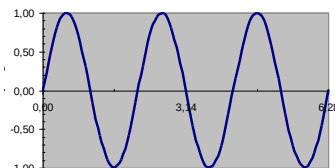


Grondtoon of 1^{ste} harmonische

Alleen deze tonen kan je aanslaan!

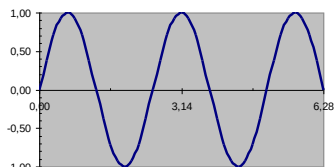
(L, F en m onveranderd)

$$f_6 = 6 f_1$$



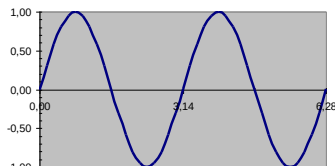
6^{de} harmonische

$$f_5 = 5 f_1$$



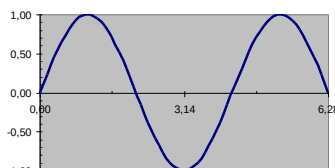
5^{de} harmonische

$$f_4 = 4 f_1$$



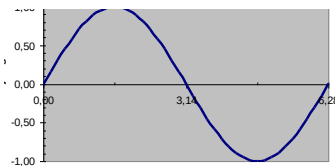
4^{de} harmonische

$$f_3 = 3 f_1$$



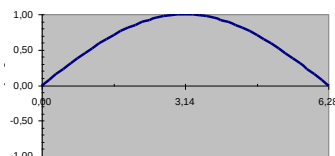
3^{de} harmonische

$$f_2 = 2 f_1$$



2^{de} harmonische

$$f_1$$



Grondtoon of
1^{ste} harmonische

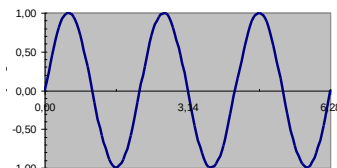
Wiskundig model
ontwerpen
met
(golf)**lengtes?**

Zoek verband tussen
gegeven **lengte L** en
de **golflengtes?**

Wiskundig model met (golf)lengtes!

(L, F en m onveranderd)

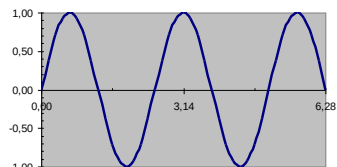
$$f_6 = 6 f_1$$



6^{de} harmonische

$$L = 6 \frac{\lambda}{2}$$

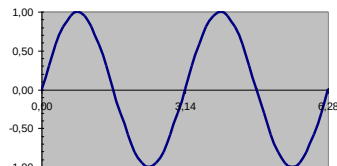
$$f_5 = 5 f_1$$



5^{de} harmonische

$$L = 5 \frac{\lambda}{2}$$

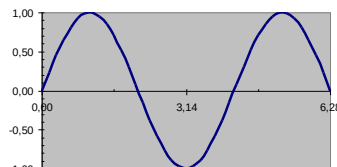
$$f_4 = 4 f_1$$



4^{de} harmonische

$$L = 4 \frac{\lambda}{2}$$

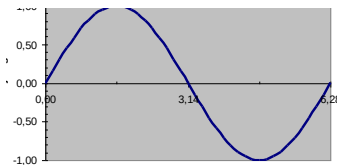
$$f_3 = 3 f_1$$



3^{de} harmonische

$$L = 3 \frac{\lambda}{2}$$

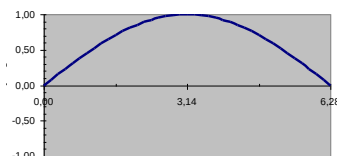
$$f_2 = 2 f_1$$



2^{de} harmonische

$$L = 2 \frac{\lambda}{2}$$

$$f_1$$



Grondtoon of
1^{ste} harmonische

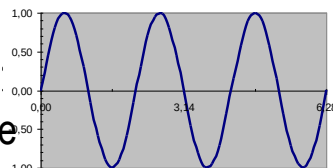
$$L = 1 \frac{\lambda}{2}$$

$$L = n \frac{\lambda}{2}$$

Kan je (golf)**lengtes** meten door te **horen** i.p.v. zien?

$$f_6 = 6 f_1$$

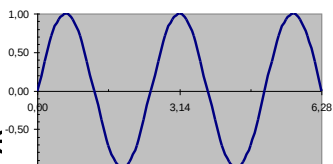
6^{de} harmonische



$$L = 6 \frac{\lambda}{2}$$

$$f_5 = 5 f_1$$

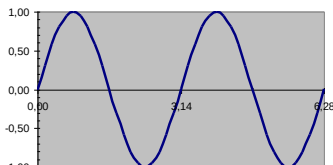
5^{de} harmonische



$$L = 5 \frac{\lambda}{2}$$

$$f_4 = 4 f_1$$

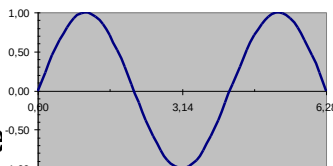
4^{de} harmonisch



$$L = 4 \frac{\lambda}{2}$$

$$f_3 = 3 f_1$$

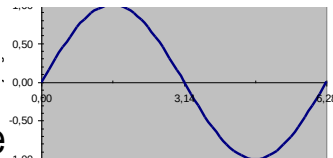
3^{de} harmonische



$$L = 3 \frac{\lambda}{2}$$

$$f_2 = 2 f_1$$

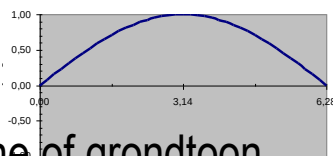
2^{de} harmonische



$$L = 2 \frac{\lambda}{2}$$

$$f_1$$

1^{ste} harmonische of grondtoon



$$L = 1 \frac{\lambda}{2}$$

L, F en m onveranderd laten:
snaar slechts aanraken, niet
verkorten!

Enz.

Verdeel snaar in 4
gelijke delen

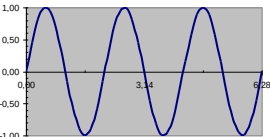
Verdeel snaar in 3
gelijke delen

Verdeel snaar in 2
gelijke delen

Wat zegt ons model over het aanslaan van tonen/golffuncties?

$$f_6 = 6 f_1$$

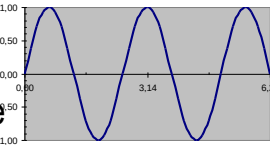
6^{de} harmonische



$$L = 6 \frac{\lambda}{2}$$

$$f_5 = 5 f_1$$

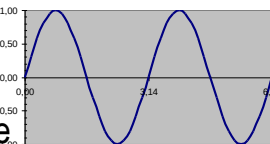
5^{de} harmonische



$$L = 5 \frac{\lambda}{2}$$

$$f_4 = 4 f_1$$

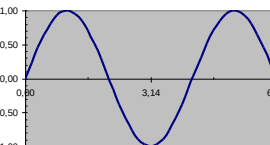
4^{de} harmonische



$$L = 4 \frac{\lambda}{2}$$

$$f_3 = 3 f_1$$

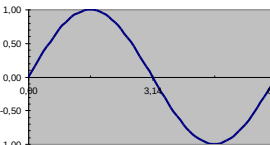
3^{de} harmonische



$$L = 3 \frac{\lambda}{2}$$

$$f_2 = 2 f_1$$

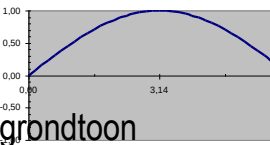
2^{de} harmonische



$$L = 2 \frac{\lambda}{2}$$

$$f_1$$

1^{ste} harmonische of grondtoon



$$L = 1 \frac{\lambda}{2}$$

Alleen tonen waarvan de λ
past in de L

$$L = n \frac{\lambda}{2}$$

kunnen bestaan!

Slechts tonen waarvan de halve
golflengtes een geheel aantal
keer in de lengte past,
kunnen bestaan!

-> Hoorbaar!

**Een golf met een
frequentie
die niet in de rij past,
dooft zichzelf uit.**

Analogie met golffunctie
in kwantumtheorie

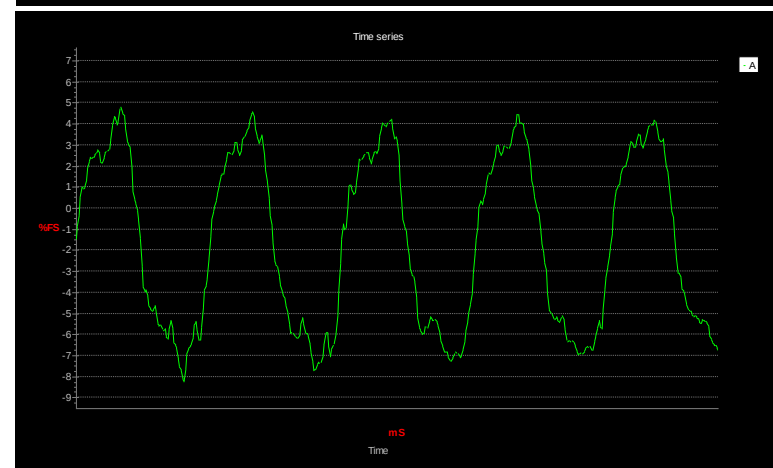
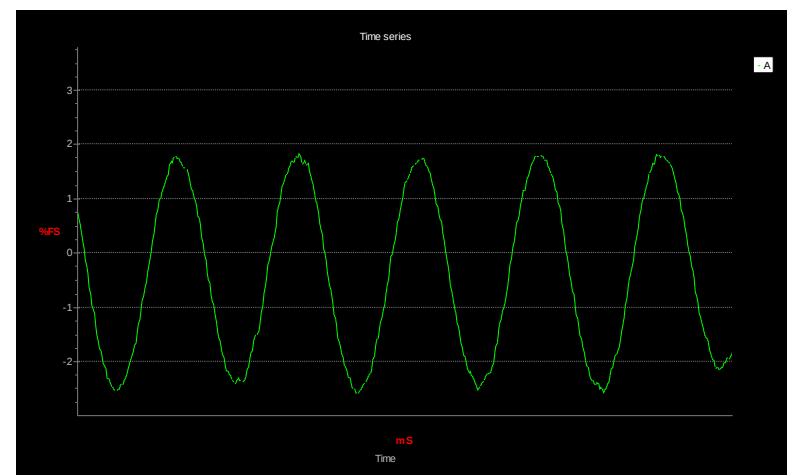
rond **Timbre**

Waarom klinkt een noot op het ene instrument anders dan op het andere?

De **golfvorm** verschilt

- Bv.
A (la) op **Stemvork**:
440 Hz, sinusgolfvorm

- A (la) op **Fluit**:
opnieuw 440 Hz maar
andere, rijkere golfvorm

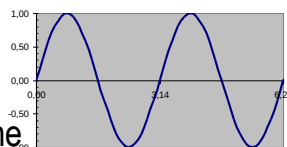


Ok, de **golfvorm** maakt het **timbre** van de toon uit.

Kunnen we met ons model (de natuurlijke tonenrij) iets meer begrijpen hoe de golfvorm het timbre bepaalt?

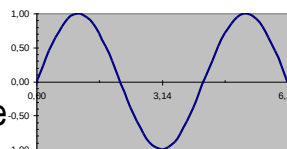
$$f_4 = 4 f_1 \quad L = 4 \frac{\lambda}{2}$$

4^{de} harmonische



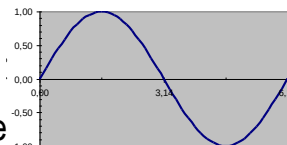
$$f_3 = 3 f_1 \quad L = 3 \frac{\lambda}{2}$$

3^{de} harmonische



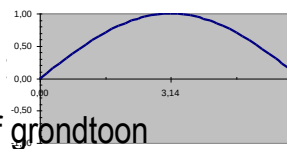
$$f_2 = 2 f_1 \quad L = 2 \frac{\lambda}{2}$$

2^{de} harmonische

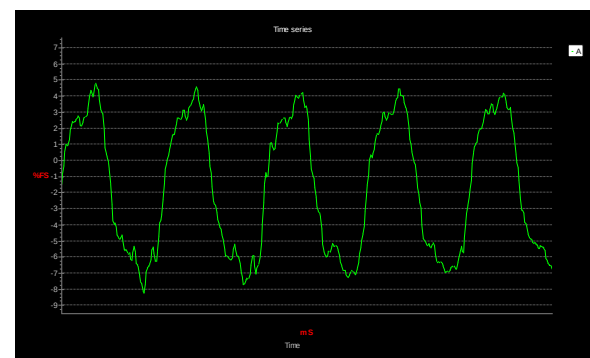
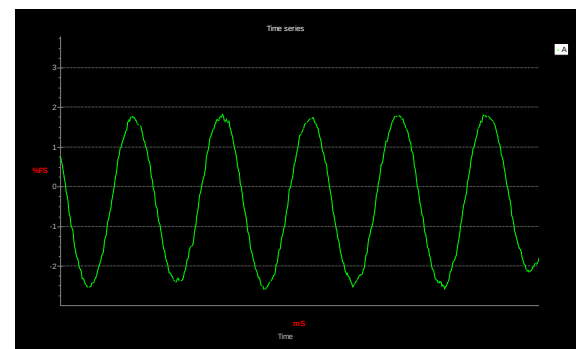


$$f_1 \quad L = 1 \frac{\lambda}{2}$$

1^{ste} harmonische of grondtoon



?



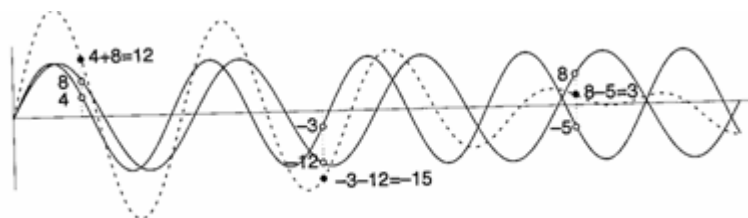
Timbre, Golfvorm, tonen samenstellen?

Eén toon = meerdere tonen?

Wiskundig model
ontwerpen

over samenstellen van tonen?!

Hoe maken we een som van 2 golven?

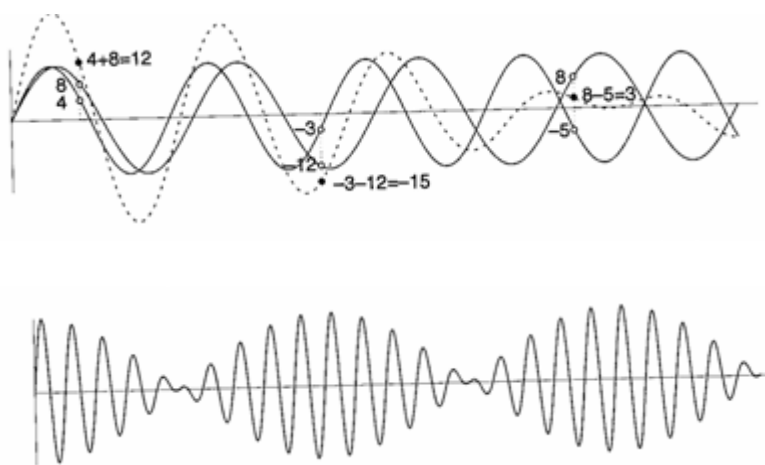


*We maken op elke plaats
de som van de uitwijkingen.*

Krijg je een vaste golfvorm?

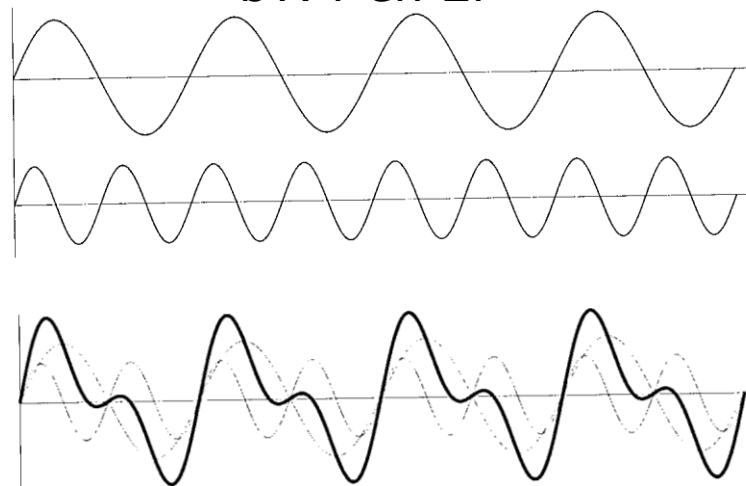
Samenstellen van 2 tonen

*met willekeurig
verschillende f 's*



*Geen golfvorm zoals een
instrument toon maakt.*

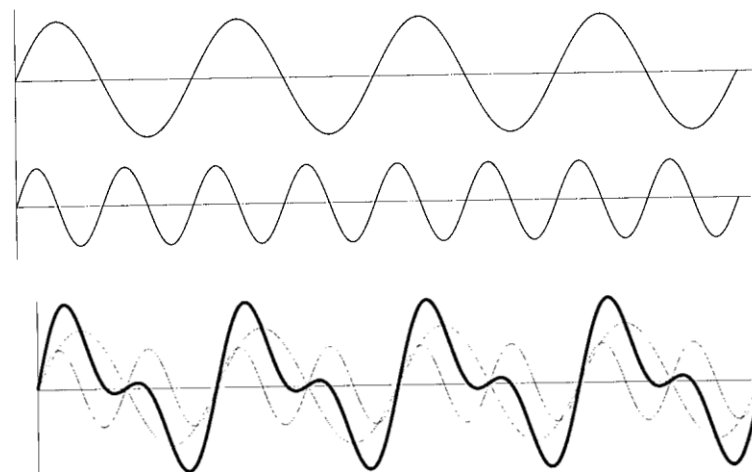
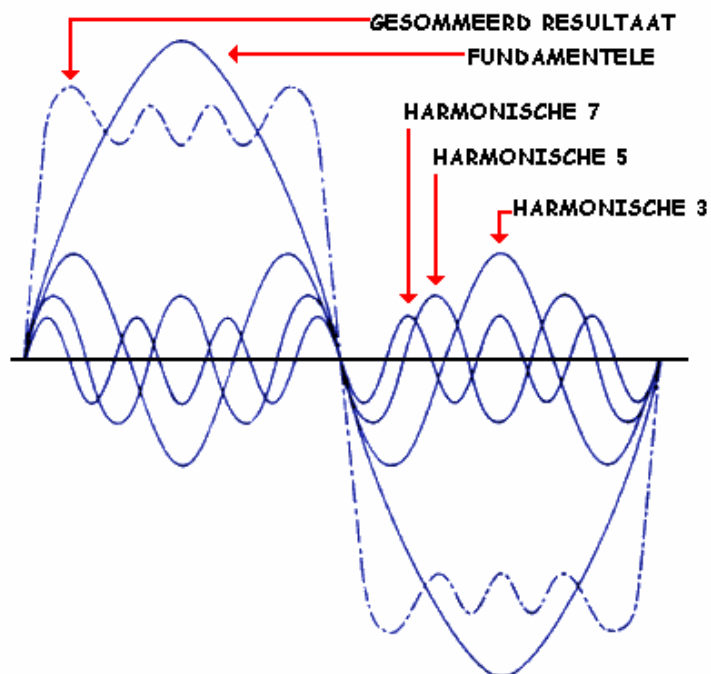
*met f 's die zich precies
verhouden zoals in de
natuurlijke rij:
bv. f en $2f$*



*Een golfvorm zoals van een
instrument!*

Golven uit de natuurlijke rij samenstellen!

Verschillende tonen uit de rij samenstellen
+
Amplitude van termen in de som variëren



*Een golfvorm zoals van een
instrument!*

Timbre

Wat kan het model verklaren over het timbre van verschillende instrumenten?

Een toon van een instrument:

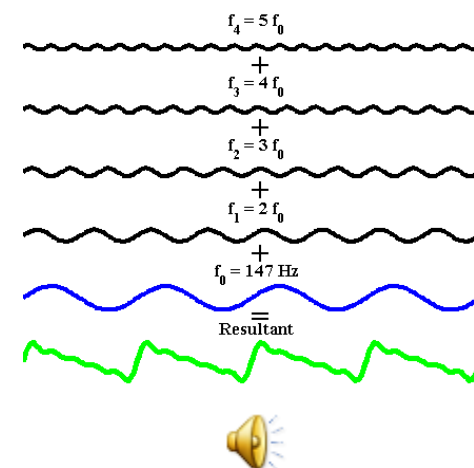
Bestaat uit een samengestelde golf.

Golf is som is van harmonischen uit de natuurlijke rij.

Waarom klinkt een la op het ene instrument anders dan op het andere?

De relatieve sterkte van elke harmonische in de som verschilt van instrument tot instrument

-> andere klankkleur



D met 4 boventonen

Timbre en de natuurlijke tonenrij

Kan je het bestaan van boventonen en hun relatieve sterkte meten?

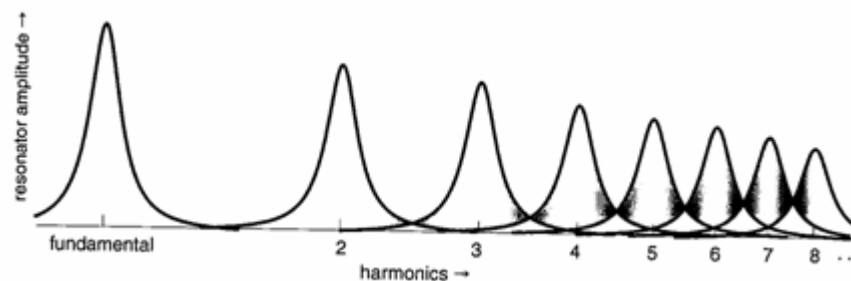
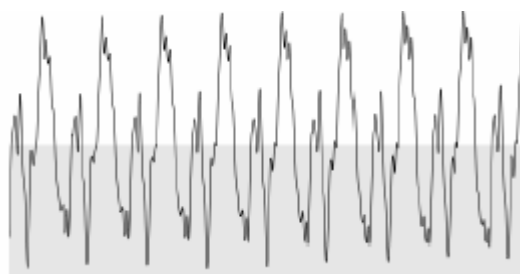
Spectrum analyseren met (freeware-)software

bv. Visual Analyser, AudoXplorer,...

- > spectrum meten van zelfde noot op bv. stemvork en fluit



Visual Analyser & Ink



*Toon bestaat als een
som van harmonieken uit de
natuurlijke rij!*

Model toepassen op timbre van...

Stem?

- Klankkleur van de ene mens t.o.v. de andere
- Mannelijke stem t.o.v. vrouwelijke stem
 - Grondtoon ligt een octaaf hoger bij vrouw
- Het uitspreken van klinkers (a,e,i,o,u):
 - Door stand van mond worden de relatieve sterkte van hogere harmonieken gewijzigd.
- Zingen
- Boventoonzingen

Melodie en Harmonie

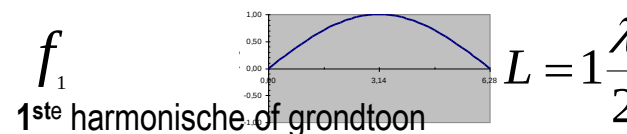
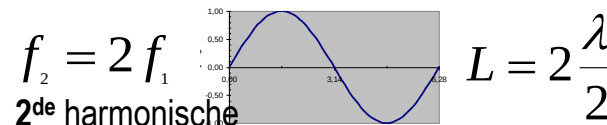
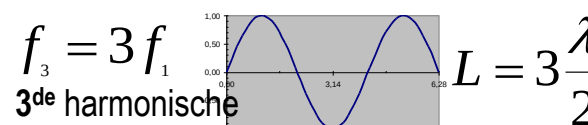
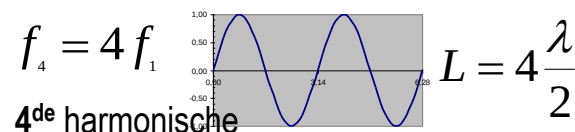
Eén toon is geen muziek:

- Tonen laten samenklinken: **harmonie**
- Tonen na elkaar spelen: **melodie**
- Musiceren: **toonladder** nodig

?

Model?

Model van de natuurlijke tonenrij



Melodie en Harmonie: **Samenklanken**

Wat is een tooninterval?

Het toonhoogteverschil tussen 2 tonen

2 tonen samen laten horen

Sommige klinken goed samen: **consonant**

Andere samenklanken zijn **dissonant**.

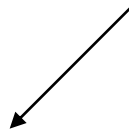
Heeft consonantie en dissonantie
iets te maken met
de **natuurlijke rij van de tonen**?

Melodie en Harmonie: **Samenklanken**

Wat zouden *natuurlijke* intervallen zijn?

Het toonhoogteverschil tussen 2 tonen uit de natuurlijke rij.

Speelwijze op instrumenten: F, m en L wijzigen?

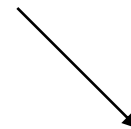


Als F, m, L onveranderd blijven

Natuurlijke rij opwekken op chordofonen of aerofonen

Bij de sommige instrumenten of sommige speelwijzen

bv. flageoletten op viool of gitaar, tromba marina, alpenhoorn



Als F, m, L gewijzigd worden:

Bv. lengte van buis of snaar wijzigen.

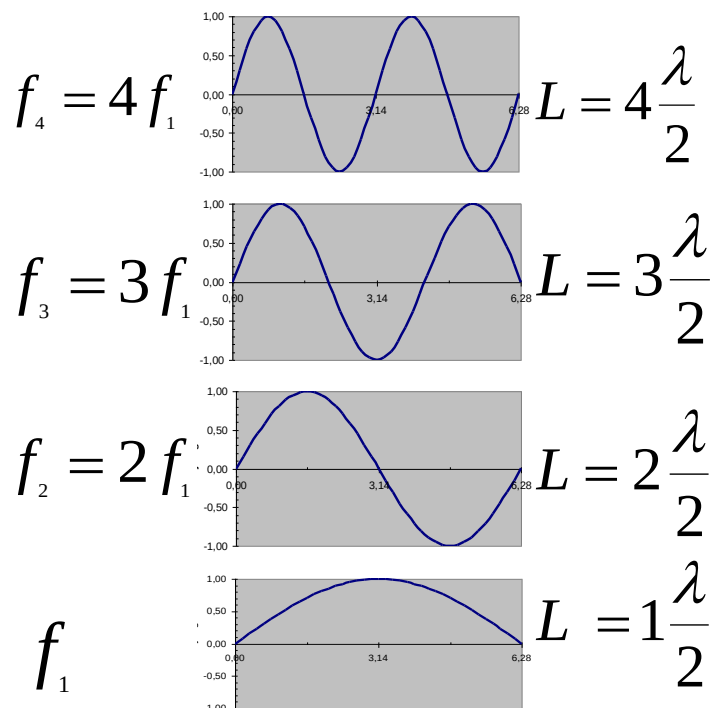
Bij de meeste instrumenten

bv. flageoletten op viool of gitaar, tromba marina, alpenhoorn

Melodie en Harmonie: **Samenklanken**

F, m, L onveranderd blijven

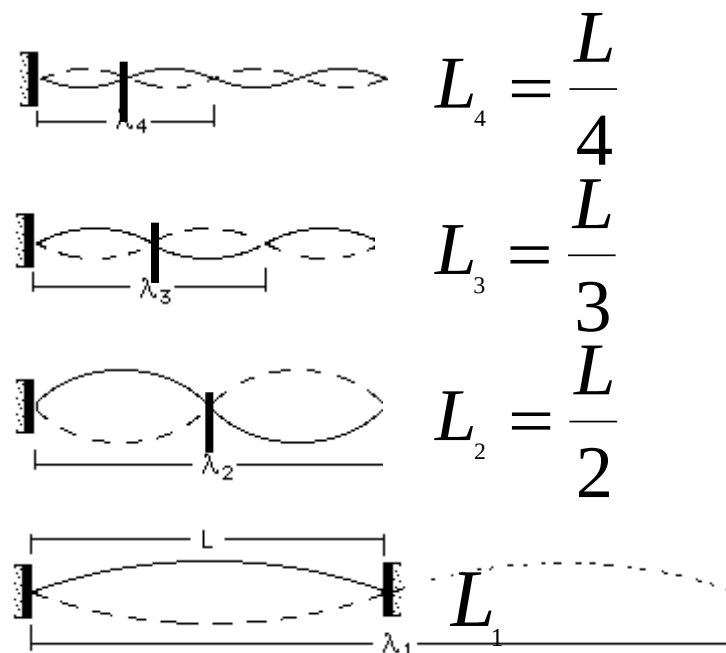
Tonen van de natuurlijke rij
Gekwantiseerde tonen



F, m, L wel veranderen.

Grondtoon wordt aangeslagen.
Continue toonhoogtevariatie

Bv. op snaar lengtes veranderen



Tonen uit de tonenrij spelen? bv. de lengte verkorten
volgens de rij $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \dots$

Melodie en Harmonie: **Samenklanken**

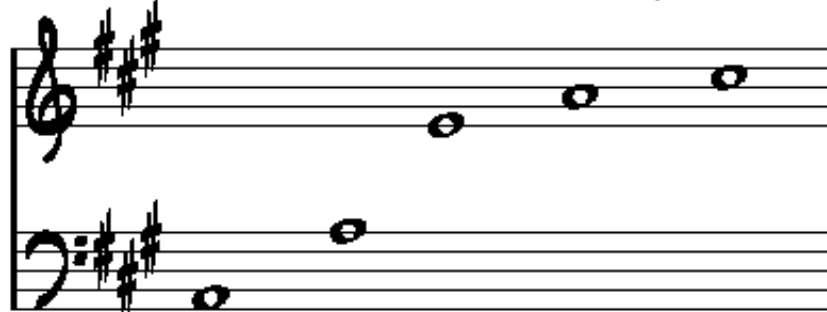
2 (opeenvolgende) tonen uit de natuurlijke rij
samen laten klinken:

Consonant of dissonant?

Bv.
een toon (uit de rij)
samen met de
voorgaande

R1, R8, R5, R4, Rgr3, ...

prime, octaaf, kwint, kwart, grote terts, ...



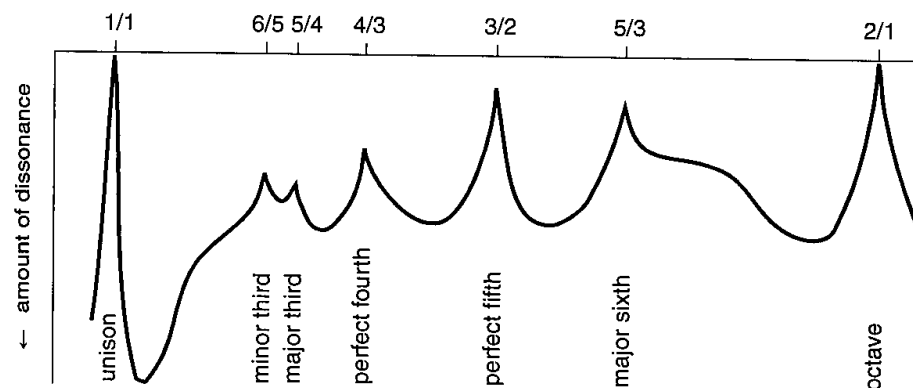
1 2 3 4 5
110Hz 220Hz 330Hz 440Hz 550Hz 6

f – verhoudingen

$\frac{1}{1}$, $\frac{2}{1}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{4}{3}$, $\frac{5}{4}$, ...

Melodie en Harmonie: **Samenklanken**

Welke intervallen zijn consonant? (Plomp en Levelt)



Hoe consonantie begrijpen?

- Mogelijk met ons model van de natuurlijke rij van de tonen?
- **Samenklanken** is het **optellen van trillingen**.
- Nieuwe golfvorm is een som van sinussen. In deze **som** komen de **harmonieken** van de **beide grondtonen** voor.

Melodie en Harmonie: **Samenklanken**

Consonantie van tonen uit de natuurlijke rij?

- Bv. Consonantie van de kwint
-> bekijk spectra van grondtoon en hogere toon

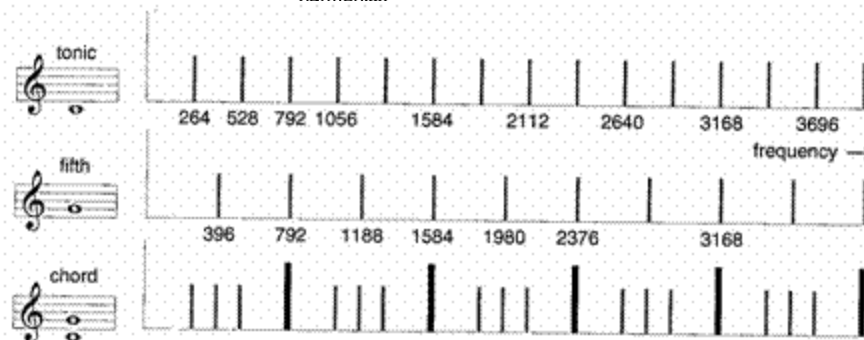
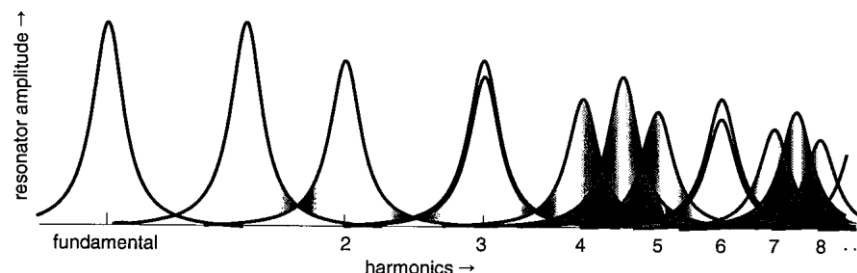
Voor elke 2 trillingen van de lagere toon, maakt de hogere toon er 3.
Beide klanken hebben een boventoon die in dezelfde tijd 6 trillingen maakt.

$$\frac{f_3}{f_2} = \frac{3f_1}{2f_2} = \frac{3}{2}$$

- bv. C (do)- G(sol)
 $f_3/f_1 = 3/2$

3^{de} harmoniek C = 2^{de} van G
want $3 \times 2 = 2 \times 3$

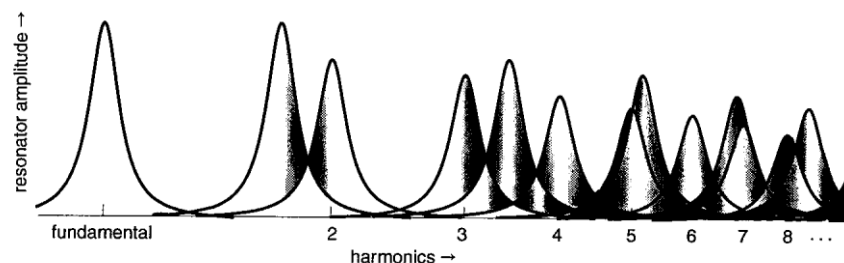
6^{de} harmoniek C = 4^{de} van G
want $2 \times 6 = 4 \times 3$



Melodie en Harmonie: **Samenklanken**

Maar dissonantie...

- Bij geringe afwijking van de grondtonen, wijken de boventonen sterk van elkaar af, want hun frequenties zijn een veelvoud van de grondtoon. Het verschil in f 's is dan ook een veelvoud. Terwijl bij de grondtoon een langzame zweving optreedt, treedt er een snelle (metallische) zweving op in de boventonen.

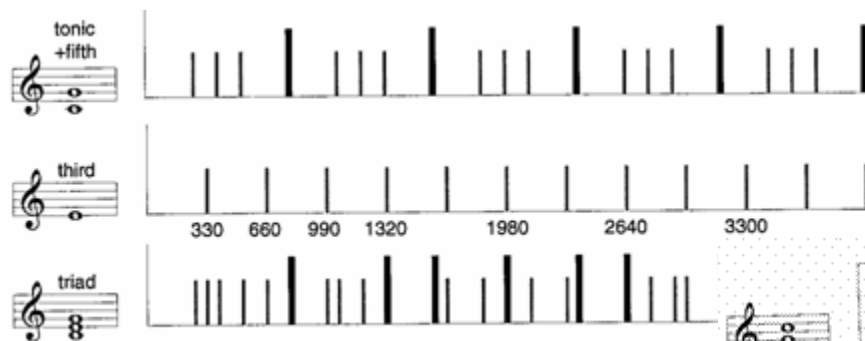


Consonantie... uitgebreid gebied

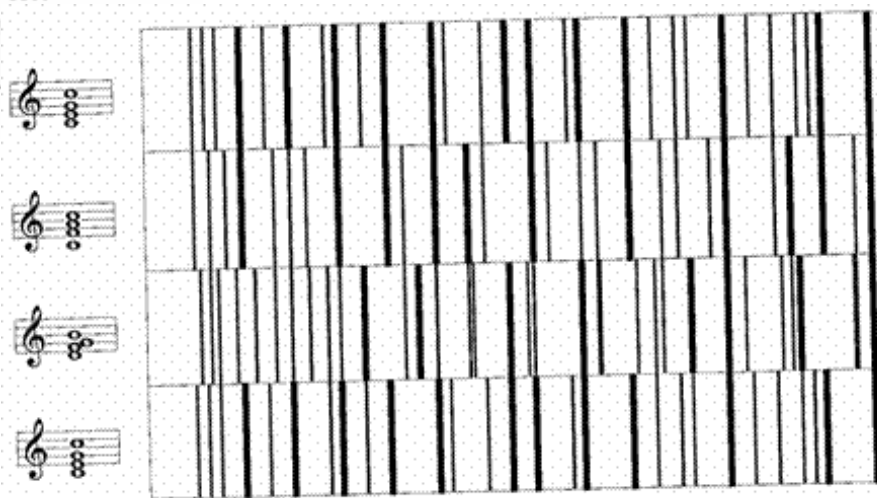
- Verschiltonen, slakkenhuis in het oor,...
Zie bv. Hermann Helmholtz '*On the sensations of Tone*'

Melodie en Harmonie: **Samenklanken**

Het **akkoord** is de basisbouwsteen van de muziekcompositie...



Musiceren is het continu wijzigen van een patroon van harmonieken.



Consonantie... uitgebreid gebied

- Verschiltonen, slakkenhuis in het oor,...
Zie bv. Hermann Helmholtz '*On the sensations of Tone*'

Melodie en Harmonie: **Klanken na elkaar**

Een melodie is een **opeenvolging** van intervallen, met spanning en ontspanning

- Mens hoort de vooral de opeenvolgende intervallen: een melodie getransponeerd (een interval hoger of lager gespeeld) -> wordt herkend als dezelfde melodie.

100 Hz en daarna 150 Hz

(voor het gehoor)

=

200 Hz en daarna 300 Hz

- Niet zozeer de absolute toonhoogte wordt gehoord maar wel de relatieve **verhoudingen van na elkaar gespeelde tonen** -> wiskundig proportioneel gehoor!

Melodie en Harmonie: **Toonladder**

Wat is een toonladder?

Een **rij van tonen** die eindigt met een toon die een **octaaf** hoger ligt (een **dubbele frequentie** heeft).

Tussen de tonen van een toonladder zitten welbepaalde **intervallen**. Verander je die intervalgrootte ergens, dan krijgt je toonladder een ander **karakter**.

<- proportioneel gehoor van de mens

Welke intervallen ga je kiezen om een toonladder te bouwen?

prime, octaaf, kwint, kwart, grote terts, ...

$$f - \text{verhoudingen} \quad \frac{1}{1}, \frac{2}{1}, \frac{3}{2}, \frac{4}{3}, \frac{5}{4}, \dots$$

Maar, je moet bij het stapelen terug uitkomen op tonen die er (op een octaaf na) reeds waren?

Melodie en Harmonie: **Toonladder**

Hoe een toonladder bouwen met natuurlijke intervallen?

door octaven te stapelen? $f_n = 2 f_{n-1}$

Je krijgt maar één interval in je toonladder -> 'eentonig'

door grote tertsen te stapelen?

Je krijgt slechts 3 verschillende intervallen die zich voortdurend herhalen -> 'eentonig'

$$f_n = \frac{5}{4} f_{n-1}$$

C (do) – E (mi) – G_{is} (sol #) - C

door kwartsprongen te maken?

Kwartsprongen naar beneden maken is hetzelfde dan kwintsprongen naar boven omdat

$$f_n = \frac{4}{3} f_{n-1}$$

Kwart + kwint = octaaf

$$f_n = \frac{4}{3} \cdot \frac{3}{2} f_{n-1} = 2 f_{n-1}$$

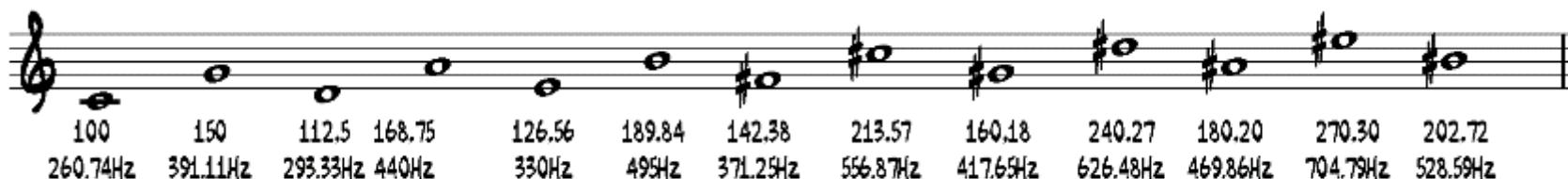
Melodie en Harmonie: **Toonladder**

-> toonladder bouwen met kwinten te stapelen!



$$f_n = \frac{3}{2} f_{n-1}$$

Kom je terug uit op tonen die er (op een octaaf na) reeds waren?



- Kwintenspiraal, geen kwintencirkel
- Na **12** kwintsprongen kom je uit op si# ≠ do.
- Afwijking **202,72 / 100 = 1,36%**, Pythagoreïsche komma

$$260,74 \times 2 = 521,48 \text{ Hz}$$

Probleem -> steeds nieuwe tonen

-> *toonladderconstructie eigenlijk onmogelijk*

Melodie en Harmonie: **Toonladder**

Waarom kan je met kwintsprongen nooit op een aantal keer f_1 geoctaveerd uitkomen?

$$f_1 \cdot \underbrace{\frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \dots \frac{3}{2}}_{a \text{ keer}} \stackrel{?}{=} \underbrace{2 \cdot 2 \dots 2}_{c \text{ keer}} f_1$$

Kan je door vanaf de grondtoon kwintsprongen te maken (een gehele aantal keer met $3/2$ vermenigvuldigen) uitkomen op een toon die enkele octaven hoger ligt?

$$f_1 \cdot \underbrace{3 \cdot 3 \dots 3}_{a \text{ keer}} \stackrel{?}{=} \underbrace{2 \cdot 2 \dots 2}_{c \text{ keer}} \underbrace{2 \cdot 2 \dots 2}_{a \text{ keer}} f_1$$

$$\underbrace{3 \cdot 3 \dots 3}_{a \text{ keer}} \stackrel{?}{=} \underbrace{2 \cdot 2 \dots 2}_{b \text{ keer}}$$

2 en 3 zijn niet verder te ontbinden want priem

Je kan geen een gehele getallen a en b vinden zodat de toon die ontstaat door **a keer een kwint** te nemen, gelijk wordt aan de toon die ontstaat door **b keer een octaaf** te nemen!

$\neq$!

Gelijkheid kan niet voldaan worden.

Melodie en Harmonie: **Toonladder**

Maar, hoe kan je dan toch een toonladder construeren?

- Intervallen niet helemaal rein stemmen -> tonen voortbrengen die je reeds had (op een octaaf na).

Waarom loont het om de reinheid van de intervallen op te geven?

- Door genoeg te nemen met toonintervallen die niet helemaal rein zijn, ontstaat het voordeel om eindeloos te kunnen overgaan naar alle toonaarden.

Wat is een stemming (Pythagoreïsche, Reine, Gelijkzwevende, Middentoon, Welgetemperd...) ?

- Een stemming is een keuze van welke intervallen in welke mate afwijken van de reinheid.

Melodie en Harmonie: Luistervoorbeeld

Beluisteren 2 versies in een andere stemming

- Hoe hoog zijn de tertsen gestemd?

Brandenburgs Concert nr. 5, 1^{ste} beweging Allegro J.S. Bach BWV 1050

- Versie 1 Neville Marriner



- Versie 2 Jordi Savall



Vorm

Muzikale vormen zijn wiskundige structuren

- Muzikale vormen zoals liedvormen (voorzinnen, nazinnen, vraag- en antwoordstructuur, da capo, ...), sonatevorm, rondovorm, variatievorm, canon, dodekafonie, aleatoriek enz. zijn wiskundige structuren.

Bv. Meetkundige transformaties

- veranderingen in de tijd (diminutio en augmentatio)
- omkering in de tijd (kreeft),
- veranderingen in intervalgrootte (vb. BACH - CAGE),
- ...

Vorm

Meetkundige transformaties

Bv. in Canon 12 alla Quarta uit Goldbergvariaties J.S. Bach

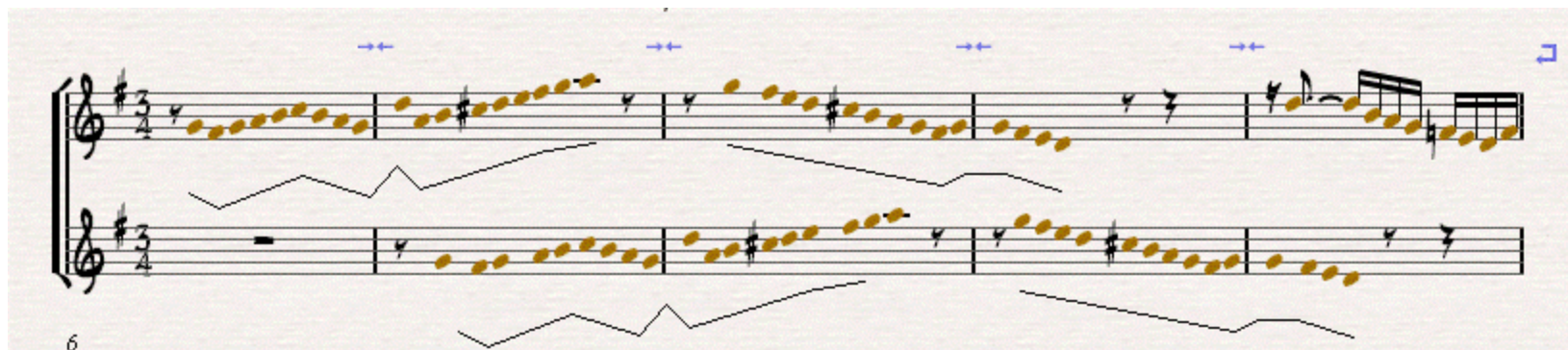


Welke meetkundige symmetrieën zijn er in dit Canon?

Vorm

Welke meetkundige symmetrieën zijn er in dit Canon?

- [1 Canon inzet na één maat zonder stok.sib](#)



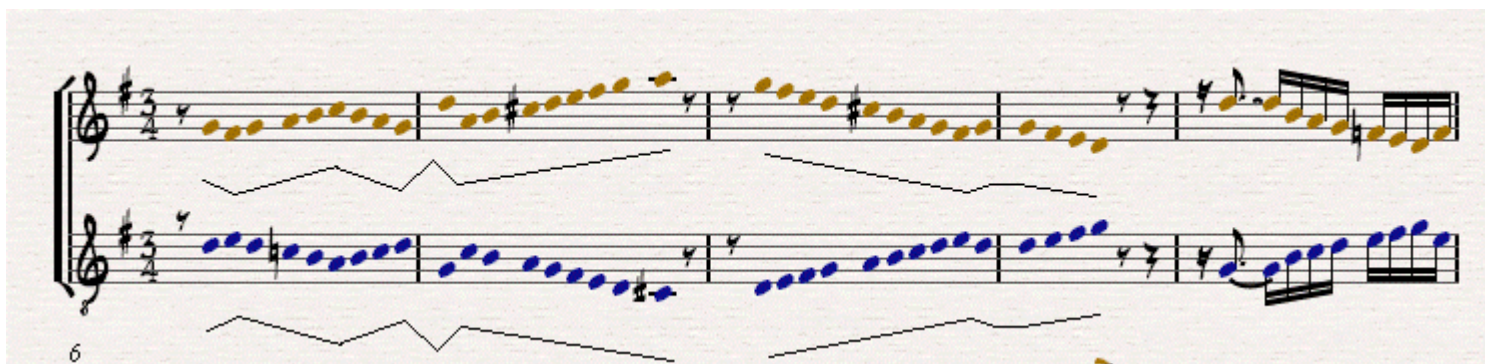
Meetkundige transformatie:

- verschuivingen in de tijd

Vorm

Welke meetkundige symmetrieën zijn er in dit Canon?

- [2_Canon gespiegeld in onderkwart gelijktijdig ingezet zonder stok.sib](#)



Meetkundige transformaties

- intervallen spiegelen rond een as

Vorm

Welke meetkundige symmetrieën zijn er in dit Canon?

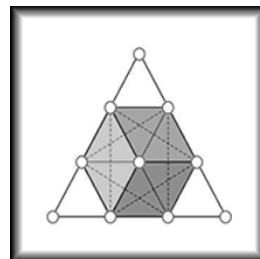
- [4 Canon gespiegeld in onderkwart inzet na één maat solseutels met baslijn.sib](#)



Meetkundige transformaties

- verschuivingen in de tijd
- intervallen spiegelen rond een as
- transpositie: verschuiving in toonhoogte

De natuurlijke rij van de tonen



Een oude band, een nieuwe band?

- Albert Einstein "Science, Philosophy, and Religion" (1941)



"The finest emotion of which we are capable is the mystic emotion. Herein lies the germ of all art and all true science. Anyone to whom this feeling is alien, who is no longer capable of wonderment and lives in a state of fear, is a dead man"

Jeroen Vanesser
Renaat Frans

NWD, 1 februari 2008